

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a
informatiky
Katedra elektroniky

Memristory a jejich aplikace

Memristors and their Applications

Prehlásanie Študenta

„ Ja, Lubomír Truchlík, prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením prof. Ing Pavla Brandštettera, Csc. Uviedol som v nej všetky literárne pramene a publikácie z ktorých som čerpal“.

V Ostravě 7. 5. 2010

Podpis študenta:

Abstrakt

TRUCHLÍK, Lubomír: Memristory a jejich aplikace. [Bakalárska práca] / Lubomír Truchlík - VŠB - Technická univerzita Ostrava. Fakulta Elektroniky a informatiky; Katedra elektroniky. - Vedúci: prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc. Stupeň odbornej kvalifikácie: Bakalár. - Ostrava: FEI, 2010

Predmetom tejto bakalárskej práce „Memristory a jejich aplikace“ je popis Memristora ako základného obvodového prvku ktorý doteraz v elektronike chýbal. Popísať Memristor od jeho predpovedania cez jeho popis a predstavu až po fyzickú realizáciu. Táto práca ďalej obsahuje definíciu základných pojmov. Popísanie fyzikálneho modelu na základe informácií publikovaných z výskumov Memristora. Teoretický rozbor Memristora a popis jeho základných vlastností. Stanovenie simulačného modelu Memristora. Simulačné overenie vlastností Memristora, ukážku simulačných priebehov v programe SPICE. Popis pre modelovanie hraničných podmienok. Poslednou časťou je význam a použitie súčiastky Memristora, jeho základné aplikácie a budúce možné uplatnenie.

Abstract

TRUCHLÍK, Lubomír: Memristors and their Applications. [Bachelor thesis] / Lubomír Truchlík - VŠB -Technical University of Ostrava. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science; Department of Electronics. - Thesis supervisor: prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc. Qualification: bachelor. - Ostrava: FEI, 2010

The subject of this bachelor work, Memristors and their applications, is description of Memristor as missing basic circuit element. This work describes Memristor from its prediction to physical realization. It also contains definition of basic terms, description of physical model based on information published about Memristor, theoretical analysis of Memristor and its features, behavior of Memristor checked by created simulation model, procedure for setting boundary conditions. The realization of model is performed using SPICE simulation tool. The last part of this work describes significance of Memristor, and its possible future applications.

Kľúčové slová

elektické napätie, elektický náboj, elektický odpor, elektický prúd, energetický nezávislá pamäť, energetický závislá pamäť, magnetický tok, meristivné systémy, Memristor, neobohatná oblasť, obohatená oblasť

Key words

voltage, electric charge, electrical resistance, electric current, non-volatile memory, volatile memory, magnetic flux, memristive systems, Memristor (Memory resistor), doped area, undoped area

Zoznam použitých symbolov a značiek

$f(x)$ - funkcia
 i [A] - elektrický prúd
 q [C] - elektrický náboj
 u [V] - elektický prúd
 u_v [$\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$] - prímes mobility
obr. č. - obrázok číslo
tab. - tabuľka
C - kapacitor
D [nm] - hrúbka vrstvičky
L - induktor
M - Memristor (Memristancia)
R [Ω] - elektický odpor
 TiO_2 - oxid titaničitý
 ϕ [Wb] - magnetický tok

Obsah

1 Úvod – Memristory	5
1.1 Základné obvodové veličiny	6
2 História objavu Memristora	7
3 Fyzikálny princíp funkcie Memristora	9
4 Popis Memristora vytvoreného v laboratóriách Hawlett Packard	10
5 Základné charakteristiky Memristora	12
5.1 Memristancia	12
5.2 Magnetický tok v pasívnej súčiastke Memristora	13
5.3 Charakteristiky Memristora	14
6 SPICE model Memristora	15
7 Demonštrácia a ukážka SPICE analýzy (simulácia v programe PSpice)	17
8 Modelovanie hraničných podmienok	22
9 Aplikácie a využitie Memristora	24
9.1 Zhrnutie základných vlastností Memristora	24
9.2 Budúce možné aplikácie Memristora	25
10 Záver	26
11 Zoznam použitej literatúry	27
12 Prílohy	28

1 Úvod - Memristory

Je čas minimalizácie. Moorov zákon raz určite musí skončiť. Aj keby pokračoval ďalších 5 alebo 15 rokov, tak určite skončí. Vývoj elektroniky bude musieť prejsť na zariadenia, ktoré sú nielen nekonečné, ale aj nekonečne schopné a funkčné.

Už takmer 150 rokov sú známe pasívne prvky, ktoré boli obmedzené len na kondenzátor, rezistor a cievku. Potom v perfektnom, ale nedocenenom článku Leon O. Chua, profesor elektrického inžinierstva na univerzite v Kalifornii, prepovedal existenciu štvrtého prvku, ktorý nazval Memristor. Dokázal, že správanie Memristora nemôže byť nahradené žiadnym z obvodov postaveným len z troch ostatných elementov. Preto je Memristor jedinečný.

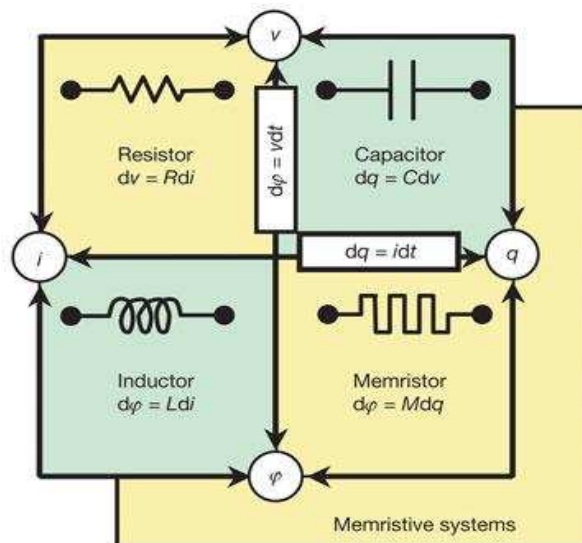
Názov Memristor je odvodený z anglického výrazu *memory rezistor* = pamäťový rezistor. Je to pasívna elektronická dvojvýchodová súčiastka s variabilným odporom, ktorá závisí od predchádzajúceho napätia a prúdu. Memristor je teda základný elektronický stavebný prvok rovnako ako cievka, kondenzátor a odpor. Nie je možné ho vyrobiť kombináciou týchto základných stavebných prvkov.



Obr. č.1 – schématická značka memristora

Na obr. č. 1. je zobrazená schématická značka Memristora. Na ďalšom obrázku, obr. č. 2., je zobrazenie troch už dobre známych obvodových prvkov (kondenzátor, rezistor, cievka) a ich vzájomných vzťahov, spolu s doteraz chýbajúcim štvrtým základným obvodovým prvkom - Memristorom a jeho vzťah k ostatným obvodovým veličinám.

Memristor bol teoreticky popísaný takmer pred 40 rokmi, ale pretože ho nikto nepostavil ani nezostrojil, bol dlho považovaný skôr za kuriozitu. Všetko sa zmenilo 1. mája 2008, keď boli publikované informácie a detaily funkčného Memristora. Memristory kombinované s tranzistorami v hybridnom čipe môžu radikálne zvýšiť výkonnosť digitálnych obvodov bez zmenšovania tranzistorov. Efektívnejšie využívanie tranzistorov nás môže posunúť do ďalšej dekády alebo minimálne zlepšiť výkon Moorovho zákona bez potreby nákladného a stále ťažšieho zdvojovania hustoty tranzistorov v čipe. Nakoniec, Memristory sa môžu stať základným kameňom nových analogových obvodov, ktoré počítajú s využitím architektúry veľmi podobnej ľudskému mozgu.



Obr. č.2 – štyri základné obvodové veličiny

1.1 Základné obvodové veličiny:

Kondenzátor - objavený v roku 1745 Benjaminom Franklinom

Kondenzátor je elektrotechnická súčiastka používaná v elektrických obvodoch k dočasnému uchovaniu elektrického náboja, a tým aj uchovaniu potenciálnej elektrickej energie. Základnou vlastnosťou pre hodnotenie kondenzátora je jeho elektrická kapacita. Technicky je kondenzátor určený maximálnym povoleným napätím a druhom dielektrika. Niekedy sa tiež používa pojem kapacitor. Pod pojmom kapacitor je myslená ideálna súčiastka, ktorej jedinou vlastnosťou je kapacita. Ako kondenzátor sa označuje skutočná súčiastka, ktorá okrem kapacity má aj ďalšie parazitné vlastnosti.

Rezistor – objavený v roku 1827 Georgom Ohmom

Rezistor je pasívna elektrotechnická súčiastka, ktorá sa v elektrickom obvode v ideálnom prípade prejavuje jej jedinou vlastnosťou – elektrickým odporom. Dôvodom pre zaradenie rezistora do obvodu je obyčajne zníženie veľkosti elektrického prúdu alebo získanie určitého úbytku napätia.

Táto súčiastka býva bežne označovaná ako odpor, čo ale môže viesť k nejednoznačnostiam kvôli novej zámene s jednosmernou veličinou – elektrickým odporom. Pre odlíšenie sa používa zastaralý pojem odporník alebo rezistor.

Cievka – objavená v roku 1831 Josephom Faradayom

Cievka je elektrotechnická súčiastka používaná v elektrických obvodoch na vytvorenie magnetického poľa elektrického prúdu, pričom sa využíva vzniknutá magnetická sila – cievka slúži ako elektromagnet. Tiež sa používa pre vytvorenie indukcie elektrického prúdu premenným magnetickým poľom – cievka slúži ako induktor (nositeľ indukčnosti).

Memristor – predpovedaný v roku 1971 Leonom O. Chuavom, objavený Stanleyom Williamsom v laboratóriách Hewlett Packard v roku 2008

2 História objavu Memristora

História Memristora (Memory Resistor) oficiálne začína dátumom 5. 9. 1971, kedy profesor Leon Chua z kalifornskej univerzity v Barkley (zobrazený v prílohe na obr. č. 1) publikoval článok s názvom „Memristor – The Missing Circuit Element“ (Memristor – chýbajúci obvodový prvok) [1]. Základom tohto článku bola úvaha, že existuje symetria medzi základnými stavebnými elektronickými prvkami. Existuje šesť matematických vzťahov prepojujúcich štyri základné obvodové premenné. Profesor Chua v tomto článku vyvodzuje, že v záujme zachovania symetrie vzťahov medzi štvoricou základných elektrických veličín, ktorými sú elektrické napätie (u), elektrický prúd (i), elektrický náboj (q) a magnetický tok (ψ), by mal okrem rezistora (R), kapacitora (C) a induktora (L) existovať ešte štvrtý základný pasívny prvok, ktorý doposiaľ unikol pozornosti. Jeden z týchto vzťahov (náboj je časový integrál prúdu), je určený z definície dvoch premenných a ďalší vzťah (magnetický tok je časový integrál elektromotorickej sily alebo napätia) je potom určený Faradayovým indukčným zákonom. Mimo toho by tu mal byť štvrtý základný element, ktorý popisuje ostatné vlastnosti. Tento chýbajúci element profesor Leon Chua označil a nazval ako Memristor s memodporom (M) (memristancia), ktorý realizuje vzťah medzi nábojom a magnetickým tokom $d\varphi = M \times dq$. V prípade nelineárneho prvku, kde Memristor (M) je funkcia náboja (q), je V-A charakteristika nelineárnej závislosti medzi nábojom (q) a magnetickým tokom (φ) pre sínusové budenie je frekvenčne nezávislý Lissajousov obrazec a žiadnou kombináciou nelineárnych odporov, kondenzátorov a cievok (indukcií) ho nie je možné vytvoriť. Profesor Chua v roku 1976 s pánom Sung Mo Kangom ukázali, že napríklad V-A charakteristika termistora, Josephsonové prechody, neónové trubice a taktiež Hodgkin-Huxleyov model neurónu vykazujú známky V-A priebehu Memristora, teda je možné ich modelovať rovnicami popisujúcimi Memristor. Nikdy až do súčasnej doby neexistovala presná fyzická realizácia Memristora.

Pátranie po fyzikálnom princípe, ktorý by umožnil realizáciu Memristora ako pasívnej elektronickej súčiastky, bolo neúspešné.

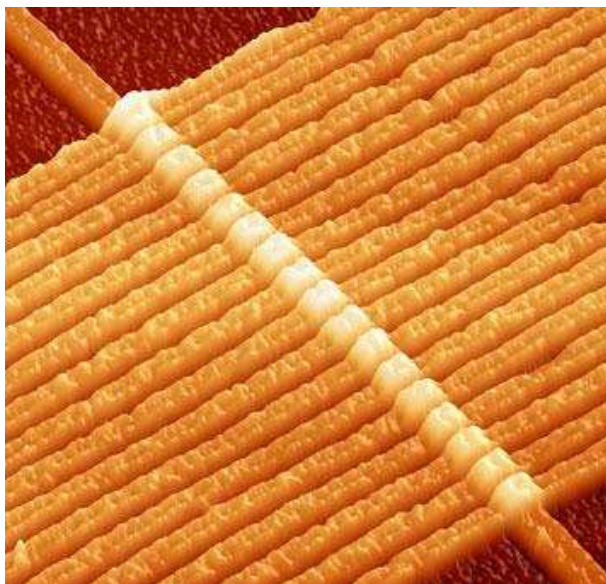
V roku 1972 však Oster a Auslander popisuje v článku [2] mechanické, hydraulické a chemické systémy, ktorých pohybové rovnice sa formálne zhodujú s rovnicami odvodenými pre elektrický Memristor. Začiatkom 70. rokov minulého storočia sa ukazovali mnohé javy, s ktorými sa v rámci rôznych špecializácií bežne stretávame, vykazujúce znaky Memristora.

V roku 1976 opäť profesor Leon Chua publikoval s pánom Sung Mo Kangom článok s názvom „Memristive Devices and Systems“ (Memristivické zariadenia a systémy). V tomto článku je definovaná trieda takzvaných memristivných systémov ako dynamických systémov s pamäťovým správaním, ktoré zahŕňajú Memristor ako špeciálny prípad týchto systémov. Táto práca umožnila identifikovať a popísať systémy najrôznejšej fyzikálnej povahy, u ktorých bola zložito vysvetlená hysterézia a vykazovali znaky memristivných systémov. Prišlo sa na to, že z matematického hľadiska nie je principiálny rozdiel napríklad medzi žiarovkou, automobilovým tlmičom a nervovou synapsiou, pretože ich pamäťové správanie je možné popísať rovnakými rovnicami.

Memristor predpovedaný a popísaný profesorom Leonom O. Chuom, nebol vyrobený a realizovaný 37 rokov. V máji 2008 bol vo vedeckom časopise uverejnený článok s názvom „The Missing Memristor found“ (Chýbajúci Memristor nájdený) [3]. Vedci z laboratórií Hewlett Packard (HP labs) v kalifornskom Palo Alto, pod vedením pána Stanley Williamsa (zobrazeného v prílohe na obr. č. 2), oficiálne oznámili, že Memristor predpovedaný v roku 1971 sa podarilo vyrobiť (Memristor z HP je zobrazený na obr. č. 4) ako polovodičovú súčiastku.

Memristor z laboratórií HP bol objavený takmer úplne náhodou. Vedci sa zaoberali výskumom oxidu titaničitého (TiO_2) a jeho využitím. Pri bombardovaní tohto materiálu atómy kyslíka menia jeho vodivosť. Tento jav bol známy už z predchádzajúcej doby a využívaný napríklad

v senzorech kyslíka a podobne. Vedci pri výskume nanometrových štruktúr pre nové integrované obvody objavili, že pokiaľ sa inak silne nevodivý polovodičový materiál TiO_2 z polovice nadotuje alebo obohatí určitými prímiesami, jeho vodivosť sa zvýši a zároveň vykazuje efekt pasívneho rezistora, označovaného ako Memristor. Celý ďalší vývoj Memristora bol potom dotiahnutý až do konečnej realizácie súčiastky a konkrétnych funkčných obvodov založených na memristoroch vytvorených 15 nm technológiou. Hlavné výsledky boli prezentované na sympóziu Memristor and Memristive System (Memristor a Memristivné systémy). Toto sympóziu bolo zvolané dňa 21. 11. 2008 v Berkeley [4]. Z priebehu sympózia v Berkeley vyplynulo, že vedci intenzívne pracujú na konštrukcii nevolatívnej (z ang. non-volatile = energeticky nezávislá) pamäte RRAM (Resistive Random Access Memory), ktorá bude využívať matice Memristorov adresovaných priečkovou štruktúrou [5]. Táto energeticky nezávislá pamäť by znamenala skutočnú revolúciu vo svete elektroniky a informačných technológií. Pretože Memristor je v princípe analógová pamäť fungujúca podľa rovnakých zákonitostí ako nervové synapsie je možné, že v budúcnosti sa na základe Memristorov vytvoria systémy, ktoré budú schopné napodobniť procesy učenia charakteristické pre mozgovú činnosť. Pozornosť sa tiež obracia k výskumu memristivných systémov.



Obr. č. 4 – ukážka skutočného Memristora vyrobeného v laboratóriách Hewlett Packard

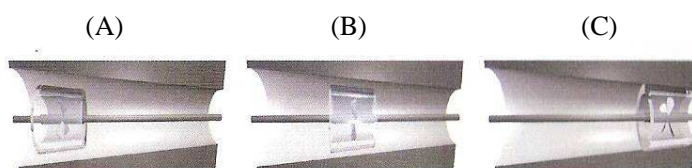
V apríli 2010 oznámili laboratóriá Hewlett Packard, že sa im podarilo vyrobiť funkčný memristor pracujúci na 1 ns, s rozmermi 3x3 nm, čo je dobrá správa pre budúcnosť elektroniky a technológie. V takejto hustote môžu Memristory konkurovať súčasným 25 nm flash pamätiam.

3 Fyzikálny princíp funkcie Memristora

Memristor je skratka pre pamäťový rezistor, pretože je to presne jeho funkcionalita, pamätať si vlastnú históriu. Memristor je dvojterminálové zariadenie, ktorého odpor závisí na magnitúde a polarite napätia aplikovaného na neho a na dĺžke času, počas ktorého bolo aplikované. Keď odpojíme napájanie, Memristor si pamätá hodnotu posledného odporu až do doby, pokiaľ napájanie znova nepripojíme.

Stanley Williams, vedúci výskumného tímu, vysvetlil funkciu Memristora na príklade trubičky, ktorou preteká tekutina. Trubička zodpovedá Memristoru, cez ktorý preteká voda, v prípade Memristora, elektrický prúd. Odpor rezistora proti prúdu vody je porovnateľný s priemerom trubičky. Čím je trubička užšia, tým je odpor väčší. Z histórie tvorby obvodov vieme, že rezistory mali pevne daný priemer trubičky, ale Memristor je trubička, ktorá mení svoj priemer v závislosti od smeru a množstva vody, ktorá cez ňu tečie. Ak voda tečie trubičkou v jednom smere, tak sa trubička rozťahuje a znižuje svoj odpor. Ale ak pustíme vodu v opačnom smere, tak sa trubička sťahuje a jej odpor sa zväčšuje. Navyše Memristor si pamätá priemer trubičky, keď voda dotečie. Po vypnutí prúdu vody, priemer trubičky "zamrzne" alebo sa zastaví do tej doby, pokiaľ voda opäť nezačne prúdiť. Táto "zamŕzacia schopnosť" predurčuje Memristor pre použitie ako perfektná počítačová pamäť. Schopnosť neobmedzene udržiavať hodnotu odporu znamená, že Memristor môže byť použitý ako energeticky nezávislá pamäť. [7]

Princíp funkcie Memristora sa dá tiež názorne vysvetliť ako je uvedené na obr. č. 5., kde je taktiež trubička, ktorou preteká tekutina, ktorá je opäť analógiou pretekajúceho elektrického prúdu. V tejto trubičke je umiestnená vrtuľka. Prúd pretekajúcej tekutiny točí vrtuľkou, ktorá sa pohybuje zátkou podľa smeru prúdu tekutiny na jednu alebo druhú stranu. Pohybom zátky sa mení aktívny prierez, a tým aj odpor, ktorý trubička kladie pretekajúcej tekutine. Ak prestane tekutina prúdiť, pohyb sa zastaví a trubička si pamätá svoj stav. So svojím aktuálnym stavom si taktiež pamätá aj odpor. Tento svoj stav si pamätá tak dlho, pokiaľ tekutina opäť nezačne prúdiť trubičkou a pohybovať vrtuľkou.



Obr.č. 5 – Model hydromechanického Memristora (Trubička, v ktorej sa nachádza vrtuľka)

Vrtuľka si teda svojou okamžitou hodnotou x pamätá celkový objem q tekutiny, ktorý v minulosti prešiel trubičkou a podľa toho spojitou riadi odpor R celej sústavy. To znamená, že $R = R(q)$. V stave (A) prúd prechádza trubičkou nielen cez vrtuľku, ale aj okolo zátky a odpor sústavy má teda minimálnu veľkosť R_{ON} . Najväčší odpor R_{OFF} má trubička na opačnej strane v druhom krajnom stave (C). V tomto stave prúd prechádza len otvorom vrtuľky. Ak sa vrtuľka pohybuje v jednom alebo druhom smere vnútri trubičky ako je zobrazené na obrázku v stave (B), celá sústava sa správa ako ideálny Memristor, teda ako rezistor ktorý spojitou mení hodnotu odporu podľa toho, aké množstvo pretekajúceho prúdu (v prípade hydromechanického Memristora - tekutiny) pretečie trubičkou. [6]

4 Popis Memristora vytvoreného v laboratóriách Hawlett Packard

Memristor vytvorený v laboratóriách Hawlett Packard (laboratória HP) je tvorený tenkou vrstvičkou oxidu titaničitého (TiO_2) hrúbky $D \approx 10\text{--}30\text{ nm}$, ktorá je uzavretá medzi dve platínové elektródy. Samotný TiO_2 je nevodivý materiál a je dobrý izolant. Jedna z vrstiev je obohatená kyslíkovými bublinami, a preto sa správa ako polovodič s pomerne dobrou vodivosťou (obohatená vrstva je znázornená na obr. č. 6 ako “doped”). Druhá, neobohatená vrstva má izolačné vlastnosti. V dôsledku komplexných procesov je šírka w obohatej oblasti modulovaná v závislosti od množstva elektrického náboja, ktorý prechádza cez Memristor. S elektrickým prúdom, ktorý prechádza v danom smere, sa hranica medzi dvoma vrstvami oxidu titaničitého mení v rovnakom smere ako je smer prechádzajúceho prúdu. Rozhraním medzi vodivou a nevodivou vrstvou je teda možné pohybovať jedným alebo druhým smerom. Ak sa Memristor odpojí od vonkajšieho napätia, prúd prestane Memristorom pretekať. Rozhranie sa zastaví a už svoju polohu nezmení, to znamená, že súčiastka si pamätá svoj odpor teoreticky nekonečne dlho. Celkový odpor Memristora R_{MEM} je daný súčtom odporov obohatej a neobohatej časti.

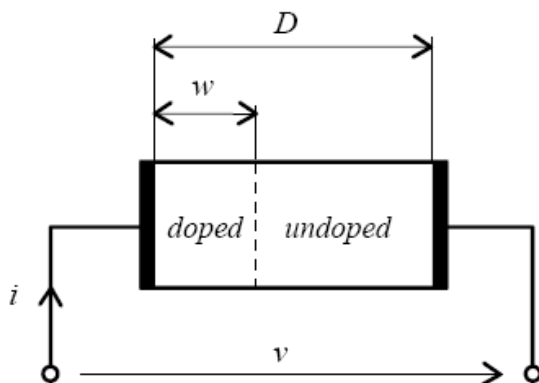
$$R_{MEM}(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1-x), \quad (1)$$

$$\text{kde } x = \frac{w}{D} \in (0,1)$$

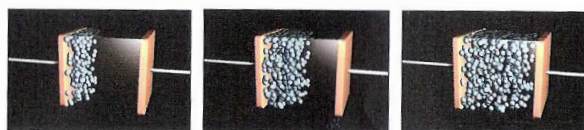
w je šírka obohatej vrstvy, D je celková šírka vrstvy TiO_2 , R_{OFF} a R_{ON} sú limitné hodnoty odporu Memristoru pre $w=0$ a $w=D$. Rovnica (1) je stavovou rovnicou popisujúcou rezistívny port.

Pomer dvoch odporov R_{OFF} a R_{ON} sa zvyčajne zadáva ako $10^2 - 10^3$. Odpor Memristora je nastaviteľný v medziach $(0 - 1)$ teda :

$$R_{MEM}(0) = R_{OFF} \text{ až } R_{MEM}(1) = R_{ON}$$



Obr.č. 6 – Model polovodičového Memristora vytvoreného v laboratóriách HP v Palo Alto



Obr. č. 7 – Pohyb kyslíkom obohatej časti vnútri Memristora HP

Ohmov zákon platí pre Memristor a je aplikovateľný medzi napätím a prúdom Memristora podľa vzťahu:

$$u(t) = R_{MEM}(w) \cdot i(t) \quad (2)$$

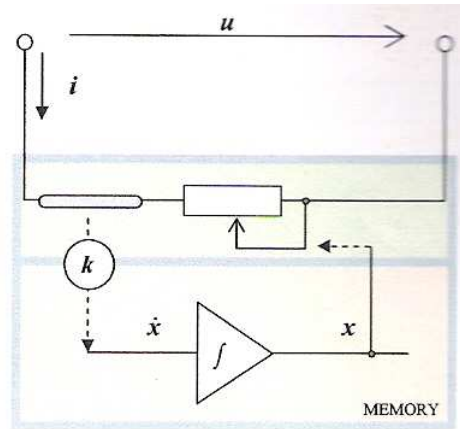
$u(t)$ je napätie Memristora, R_{MEM} celkový odpor Memristora a $i(t)$ je prúd Memristora. Rovnica (2) je stavová rovnica pre popis Memristorovej pamäte.

Rýchlosť pohybu rozhraní medzi obohatenou a neobohatenou hranicou závisí od odporu obohatenej oblasti, od veľkosti prechádzajúceho prúdu a od ďalších faktorov podľa stavu rovnice:

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot i(t) \cdot f(x), \quad k = \frac{\mu_v \cdot R_{ON}}{D^2} \quad (3)$$

kde $\mu_v \approx 10^{-14} m^2 s^{-1} V^{-1}$ je takzvanou prímesou mobility. [5]

Pamäťový princíp Memristora je zobrazený na obr. č. 8. Memristor sa správa voči okoliu ako rezistívny port riadený stavom x (poloha rozhrania) a doplnený pamäťou pre zapamätanie tohto stavu. Pamäť Memristora je tvorená mechanizmom, ktorý uskutočňuje integráciu dx/dt (rýchlosť rozhrania) v čase. Táto rýchlosť je priamo úmerná pretekajúcemu prúdu, konštantou úmernosti je k (migrančná rýchlosť nosičov náboja). Podľa smeru alebo znamienka pretekajúceho prúdu sa súradnica x zväčšuje alebo znižuje a mení hodnotu odporu tam a späť. Po odpojení Memristora od vonkajšieho budenia si zapamätá posledný stav, a tým aj poslednú hodnotu odporu. [6]



Obr. č. 8 – blokové schéma pamäťového efektu Memristora

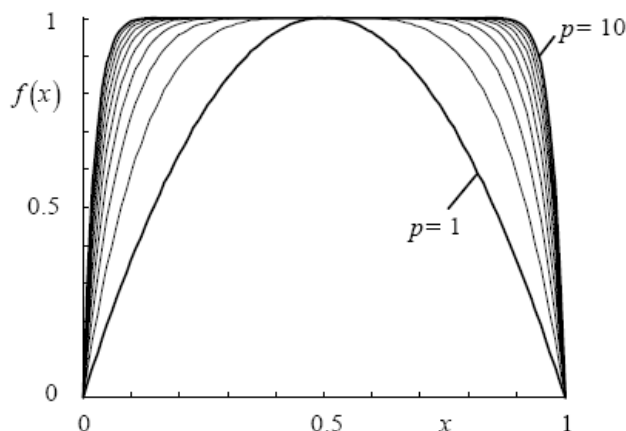
V zariadeniach nanometrových rozmerov môžu malé napätia vyvolať obrovské elektrické polia, ktoré môžu druhotne spôsobovať výrazné nelinearity pri prechode iónov. Tieto nelinearity sa prejavujú najmä na tenkej hrane vrstvičky, kde sa rýchlosť medzi obohatenou (doped) a neobohatenou (undoped) oblasťou postupne znižuje až na nulu. Tento jav nazývaný aj nelineárna prímes prúdu (Nonlinear Dopant Drift) môže byť modelovaný ako oknová funkcia $f(x)$ (window function) na pravej strane. Konkrétna oknová funkcia, ktorá by mala zodpovedať Memristoru z laboratórií Hewlett-Packard, nie je momentálne k dispozícii.

Navrhnutá oknová funkcia (window function) je v nasledujúcom tvare:

$$f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \quad (4)$$

kde p celé kladné číslo.

Forma funkcie zaručuje nulovú rýchlosť x -ovej súradnice, keď sa približuje k hraničnému stavu. Navyše rozdiely medzi modelom s lineárnym a nelineárnym priebehom miznú, keď hodnota p narastá. [6]



Obr. č. 9 – obrázok okna funkcie pre rôzne hodnoty celého kladného čísla p

5 Základné charakteristiky Memristora

5.1 Memristancia

Memristor je formálne definovaný ako dvojterminálový prvok, v ktorom magnetický tok ϕ_M medzi vstupmi je funkciou množstva elektrického náboja q , ktorý prejde zariadením. Každý Memristor je charakterizovaný jeho memristančnou funkciou, ktorá popisuje mieru zmeny magnetického toku v závislosti na náboji.[] Množstvo magnetického toku je závislé na odpore, inými slovami, pri zmene odporu sa reguluje magnetický tok.

$$M(q) = \frac{d\Phi_M}{dq}$$

Z Faradayovho indukčného zákona vyplýva, že magnetický tok je časový integrál napätia a náboj je časový integrál prúdu. Preto môžeme tento vzorec napísať v jednoduchšej forme.

$$M(q(t)) = \frac{\frac{d\Phi_M}{dt}}{\frac{dq}{dt}} = \frac{U(t)}{I(t)}$$

Z uvedenej rovnice môžeme usúdiť, že Memristancia je jednoducho závislosť náboja na odpore. Ak $M(q(t))$ je konštanta, potom získaná rovnica Ohmovho zákona $R(t) = U(t)/I(t)$ nie je triviálna, nakoľko obe strany nie sú rovné, pretože $q(t)$ a $M(q(t))$ sa budú meniť v čase. Nahradením napätia funkciou času dostaneme:

$$U(t) = M(q(t)) \cdot I(t)$$

Táto rovnica odhaľuje a ukazuje, že Memristancia definuje lineárny vzťah medzi napätím a prúdom, pokiaľ sa M nemení s nábojom. Samozrejme nenulová hodnota prúdu ($I(t) \neq 0$) znamená časovo premenlivý náboj. Striedavý prúd ale môže odhaliť lineárnu závislosť v obvode indukovaním merateľného napätia bez zmeny náboja, pokiaľ maximálna zmena q nespôsobí veľkú zmenu v M .

Memristor je statický, ak naň nie je aplikovaný žiadny prúd. Ak $I(t)=0$, potom aj $U(t)=0$ a $M(t)$ je konštantná. Základom pamäťového efektu je práve skutočnosť, že $M(t)$ je konštantná.

Charakteristika spotreby energie je podobná charakteristike rezistora:

$$P(t) = I(t) \cdot U(t) = I^2(t) \cdot M(q(t))$$

Pokiaľ sa $M(q(t))$ mení málo, tak ako pod striedavým prúdom, Memristor sa tvári ako rezistor. Ak sa hodnota $M(q(t))$ rýchlo zväčšuje, prúd a spotreba energie sa zastavia.

5.2 Magnetický tok v pasívnej súčiastke Memristora

V teórii obvodov magnetický tok typicky súvisí s Faradayovým zákonom indukcie, ktorý popisuje vznik elektického napätia v uzavretom obvode, ktorý je spôsobený zmenou magnetického indukčného toku. Teda Faradayov zákon hovorí, že napätie v priestore elektrického poľa vytvoreného okolo slučky sa rovná zápornej derivácii magnetického toku cez slučku:

$$\mathcal{E} = \frac{-d\Phi_M}{dt}$$

Toto môže byť analogicky rozšírené na jednu pasívnu súčiastku. Ak je obvod zostavený z pasívnych súčiastok, potom celkový magnetický tok je rovný súčtu magnetických tokov na jednotlivých súčiastkach. Napätie pasívnych súčiastok je podmienené stratou energie na jednotku náboja:

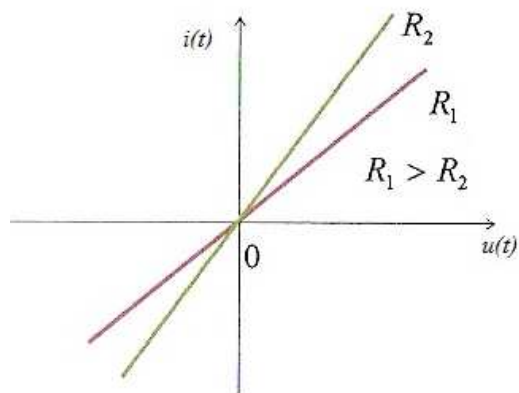
$$U = \frac{d\Phi_M}{dt}$$

$$\Phi_M = \int U dt$$

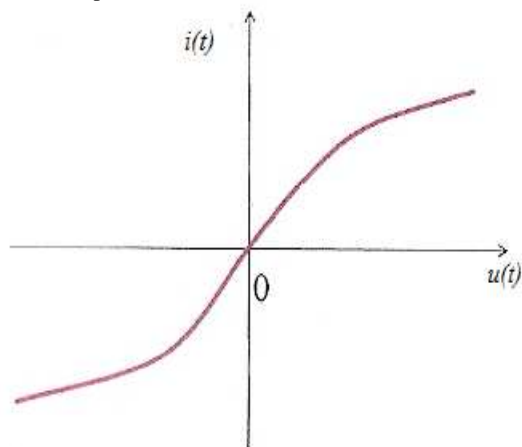
Sledujeme, že Φ_M je rovné časovému integrálu napätia medzi dvoma bodmi. Táto hodnota môže byť vypočítaná napríklad pomocou operačného zosilovača nastaveného ako integrátor. [9]

5.3 Charakteristiky Memristora

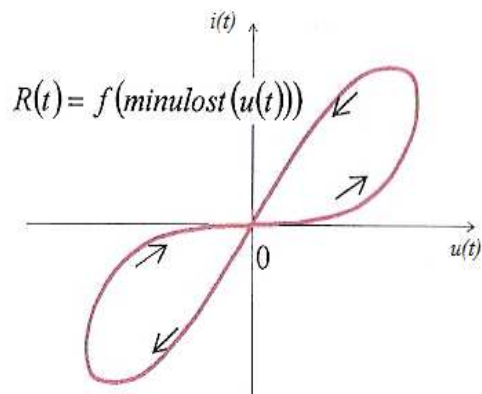
Memristor je rovnako ako obyčajný rezistor pasívna súčiastka, preto jeho ampérvoltová charakteristika prechádza počiatkom súradnicovej sústavy a celá leží v 1. a 3. kvadrante.



Obr. č. 10 (a) – Ampérvoltová charakteristika lineárneho rezistora



Obr. č. 10 (b) – Ampérvoltová charakteristika nelineárneho rezistora



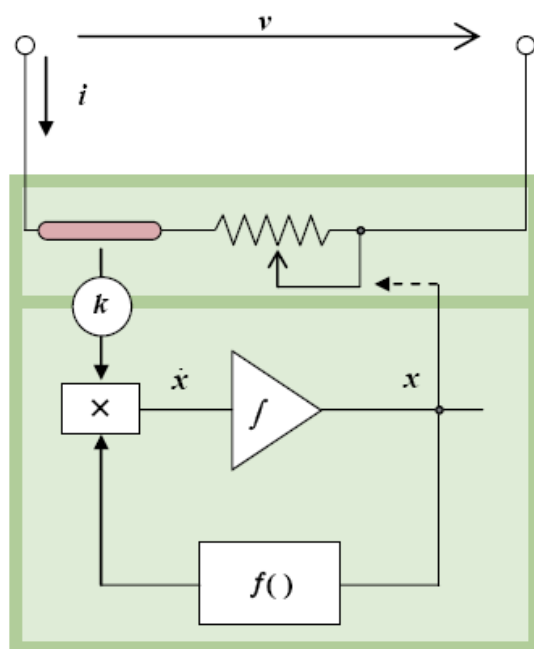
Obr. č. 10 (c) – Ampérvoltová charakteristika Memristora

Okamžitý odpor Memristora, zobrazený na obr. č. 10 (c), je závislý na okamžitom stave systému, ale aj na celej histórii systému, ktorá k tomu stavu viedla. Stav Memristora sa udáva celkovým množstvom elektrického náboja, ktorý Memristorom prešiel. Každý stav Memristora v rámci jednej periódy má jedinečný stav a priebeh. Teda každý stav má unikátnu históriu, a tým aj unikátnu smernicu pre ďalší smer pohybu. Preto sa Memristor do začiatku súradnicovej sústavy vracia po inej krivke než po akej z nej vyšiel. Ampérvoltová charakteristika má práve preto všeobecne tvar slučky. Táto slučka sa nazýva hysterézná slučka a je typickým znakom Memristora a všeobecne memristivného správania.

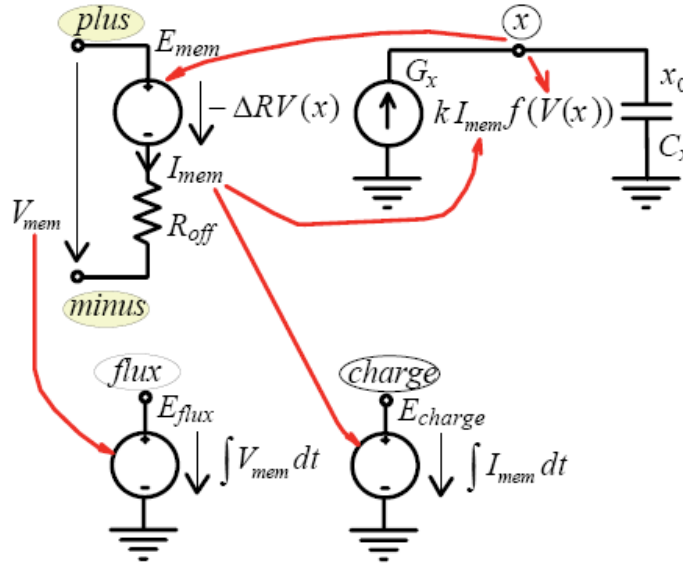
Pri zvýšení frekvencie budiaceho sínusového napätia prejde rozhranie Memristora za kratšiu periódu kratší časový úsek. Rozdiel medzi maximálnou a minimálnou hodnotou odporu Memristora klesá a taktiež klesá aj rozkmit prúdu, ktorý preteká Memristorom. Hysterézná slučka mení svoj tvar tak, že pri vysokých frekvenciách prechádza do úsečky. Smernica tejto úsečky je daná vodivosťou, ktorá odpovedá strednej hodnote polohy x , okolo ktorej rozhranie kmitá. Pri vysokých frekvenciách Memristor stráca svoje memristivné vlastnosti a charakteristiku a správa sa ako obyčajný klasický rezistor.[6]

6 SPICE model Memristora

Stavové a portové rovnice Memristora je možné modelovať blokovým diagramom zobrazeným na obr. č. 10. Pamäťový efekt Memristora je modelovaný pomocou integrátora so spätnou väzbou. Vzhľadom na obmedzujúce hraničné podmienky ukladá efekt prechádzajúceho prúdu a ovláda, kontroluje odpor Memristora zmenou pozície hranice. Nelineárny priebeh a vplyv hraničných podmienok je modelovaný nelineárnou funkciou $f()$.



Obr. č. 10 – blokový diagram modelu Memristora



Obr. č. 11 – Štruktúra SPICE modelu Memristora

Štruktúra SPICE modelu Memristora je ukázaná na obr. č. 11. Vzťah medzi napätím a prúdom Memristora je modelovaný na základe upravenej rovnice:

$$R_{MEM}(x) = R_{OFF} - x\Delta R, \quad \Delta R = R_{OFF} - R_{ON} \quad (5)$$

Rovnica (5) k obrázku obr. č. 11 zodpovedá odporu R_{OFF} v sérii s E-tytom zdroja napätia, ktorého napätie je kontrolované podľa vzorca “ $x\Delta R$ ”. Normalizovaná šírka x obohatenej vrstvy je modelovaná napätím $V(x)$ pomocou kapacitára C_x , ktorý slúži ako integrátor veľkosti pravej strany rovnice. Počiatočný stav normalizovanej šírky obohatenej vrstvy x_0 , ktorá je modelovaná ako počiatočné napätie na kondenzátore, určuje počiatočnú hodnotu odporu R_{INIT} Memristora podľa vzorca:

$$x_0 = \frac{R_{OFF} - R_{INIT}}{\Delta R} \quad (6)$$

Model je vytvorený a uskutočnený ako SPICE podobvod s parametrami, ktoré sú schopné preniesť tieto hodnoty do podobvodu ako parametre: R_{INIT} (počiatočný odpor), R_{OFF} a R_{ON} odpory, D (šírka tenkej vrstvy), μ_v (prímes mobility) a exponent p oknovej funkcie. Zoznam SPICE podobvodu spomínaný nižšie zahŕňa bežný model oknovej funkcie podľa Joglekara, ktorý je otvorený akýmkoľvek zmenám funkcií popisujúcich nelineárny priebeh. Umožňuje aj import experimentálne získaných údajov.

SPICE model je tiež doplnený o priamy výpočet integrálneho množstva, ktoré definuje Memristor, to znamená časový integrál elektrického napätia (tok) a elektrického prúdu (náboj). Hodnoty týchto veličín patria do výsledkov analýzy SPICE a sú k dispozícii ako napätia vnútorných kontrolovaných zdrojov E_{flux} (E_{tok}) a E_{charge} ($E_{náboj}$). [5]

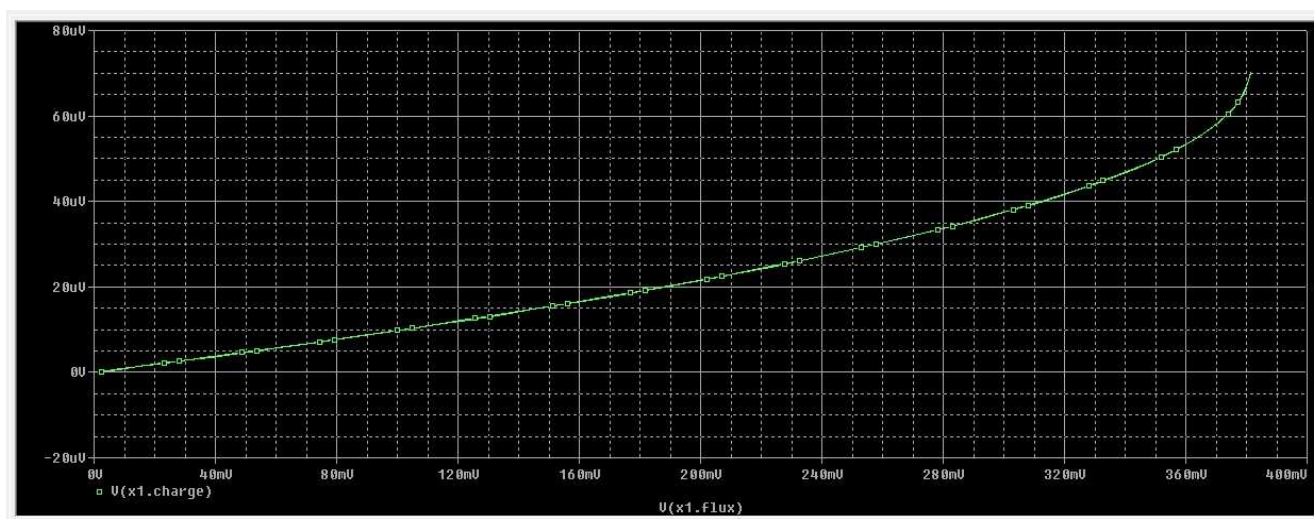
7 Demonštrácia a ukážka SPICE analýzy (simulácia v programe PSpice)

Model Memristora je zostrojený podľa tabuľky 1 (Tab. 1) [5]. V uvedenej tabuľke sú zapísané všetky vnútorné rovnice Memristora, ktoré popisujú funkčný virtuálny model Memristora. V tomto modeli sa nachádzajú parametre R_{ON} a R_{OFF} - zapínací a vypínací odpor, R_{INT} - počiatočný odpor v čase $T=0$, D - celková šírka vrstvičky TiO_2 , ktorá je uzavretá medzi dvoma platinovými elektródami a p - celé kladné číslo, ktoré popisuje okno funkcie. Tieto parametre je možné ľubovoľne nastaviť pre potreby vlastnej simulácie.

<pre> v1 1 0 sin(0 1.2 1 0 0 0) x1 1 0 memristor * HP Memristor SPICE Model * For Transient Analysis only * created by Zdenek and Dalibor Biolek ***** * Ron, Roff - Resistance in ON / OFF States * Rinit - Resistance at T=0 * D - Width of the thin film * uv - Migration coefficient * p - Parameter of the WINDOW-function * for modeling nonlinear boundary conditions * x - W/D Ratio, W is the actual width * of the doped area (from 0 to D) * .SUBCKT memristor Plus Minus PARAMS: + Ron=1K Roff=100K Rinit=80K D=10N uv=10F p=1 ***** * DIFFERENTIAL EQUATION MODELING * ***** Gx 0 x value={ I(Emem)*uv*Ron/D^2*f(V(x),p)} Cx x 0 1 IC={(Roff-Rinit)/(Roff-Ron)} Raux x 0 1T * RESISTIVE PORT OF THE MEMRISTOR * ***** Emem plus aux value={- I(Emem)*V(x)*(Roff-Ron)} Roff aux minus {Roff} ***** ***** *Flux computation* ***** ***** </pre>	<pre> Eflux flux 0 value={SDT(V(plus,minus))} ***** ***** *Charge computation* ***** ***** Echarge charge 0 value={SDT(I(Emem))} ***** ***** * WINDOW FUNCTIONS * FOR NONLINEAR DRIFT MODELING * ***** ***** *window function, according to Joglekar .func f(x,p)={1-(2*x-1)^(2*p)} *proposed window function ;.func f(x,i,p)={1-(x-stp(-i))^(2*p)} .ENDS memristor .tran 0 3 0 0.01 .probe .end </pre>
--	---

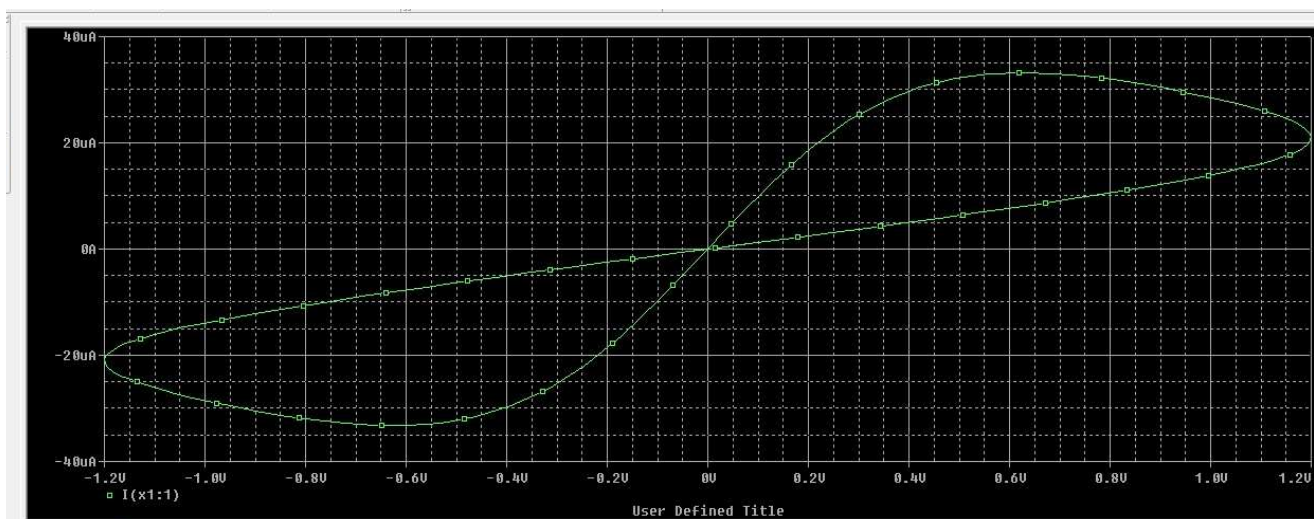
Tab.1 – SPICE model Memristora. SDT a STP sú štandardné funkcie PSpice (integrácie v časovej oblasti, jednotkový krok)

Výsledky simulácie uskutočnenej v programe PSpice sú zobrazené nižšie na obr. č. 11 až obr. č. 13. Memristor je vždy napájaný zdrojom napätia. Ako vyplýva zo zobrazených výsledkov simulácie priebehov napätia Memristora V_x zobrazených na obrázku (obr. č. 11. a 12.), Memristor pracuje v takom režime, aby hranica medzi obohatenou a neobohatenou vrstvou nedosiahla hrany. Na hranách sa prejavujú výrazné nelineárne efekty. Detailnejšie simulácie potvrdili skutočnosť, že typická hysterézná slučka, ktorá charakterizuje Memristor a memristivné systémy a nachádza sa v 1. a 3. kvadrante, sa zo zvyšujúcou frekvenciou potláča a prechádza až do priamky, ktorá charakterizuje klasický rezistor (zobrazené aj v prílohe na obr. č. 3, 4 a 5).



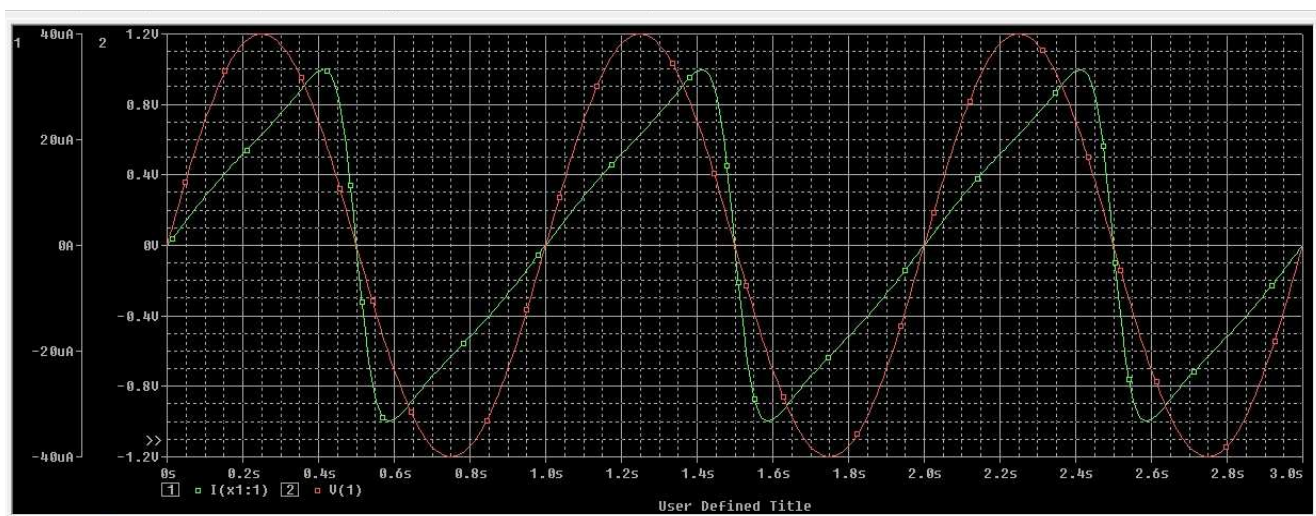
Obr. č. 11 a) – závislosť magnetického toku Memristora na náboji Memristora

Na obr. č. 11 a) je zobrazená krivka popisujúca závislosť magnetického toku (flux) na osi x a náboja Memristora (charge) na osi y.



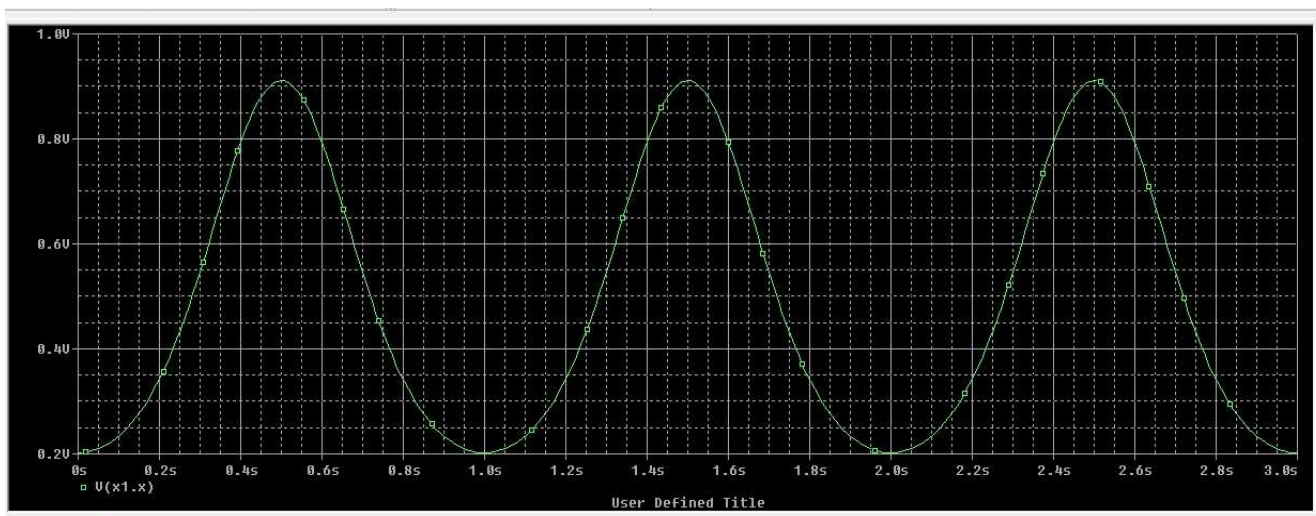
Obr. č. 11 b) – závislosť napätia Memristora na prúde Memristora

Obr. č. 11 b) zobrazuje klasickú hysteréznú slučku, ktorá je charakteristická pre Memristor. Daná hysterézná slučka je tvorená napätím Memristora V_{mem} zobrazeného na osi x a prúdom Memristora I_{mem} zobrazeného na osi y.



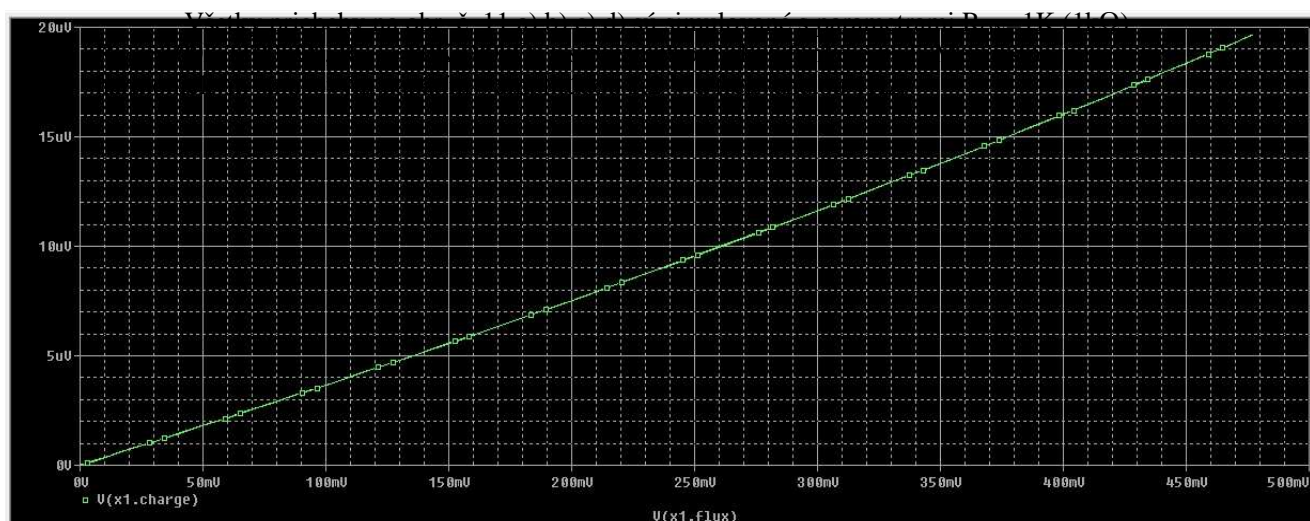
Obr. č. 11 c) – simulácia prúdu a napätia v časovej oblasti

Na obr. č. 11 c) je zelenou farbou na osi y zobrazený priebeh prúdu Memristora (I_{mem}) a napätia Memristora (V_{mem}) simulované v časovej oblasti na perióde $T=1s$.

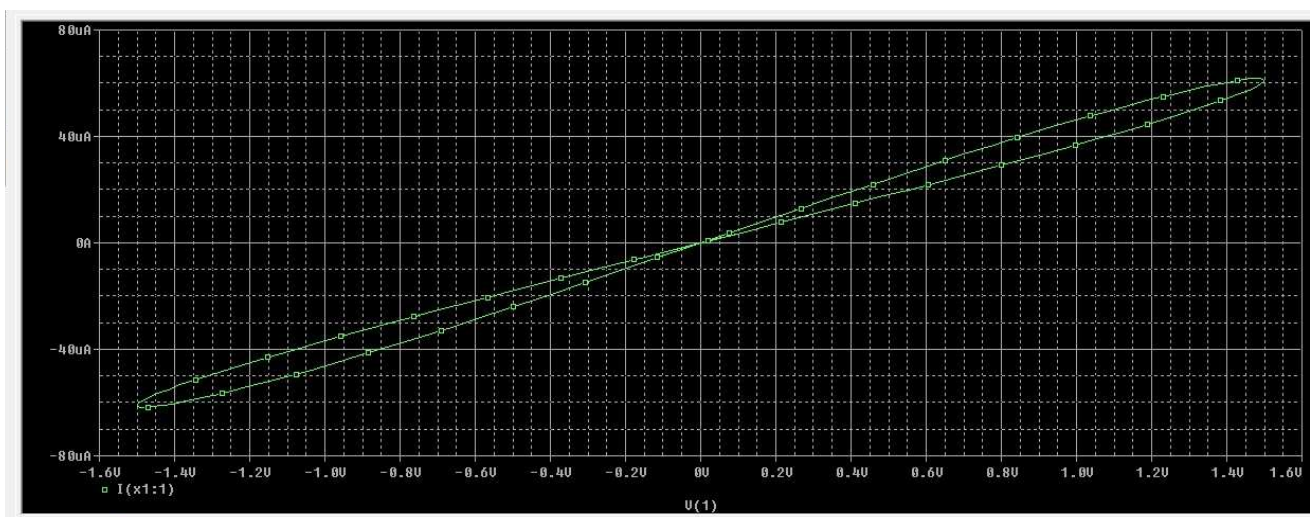


Obr. č. 11 d) – simulácia súradnice x Memristora

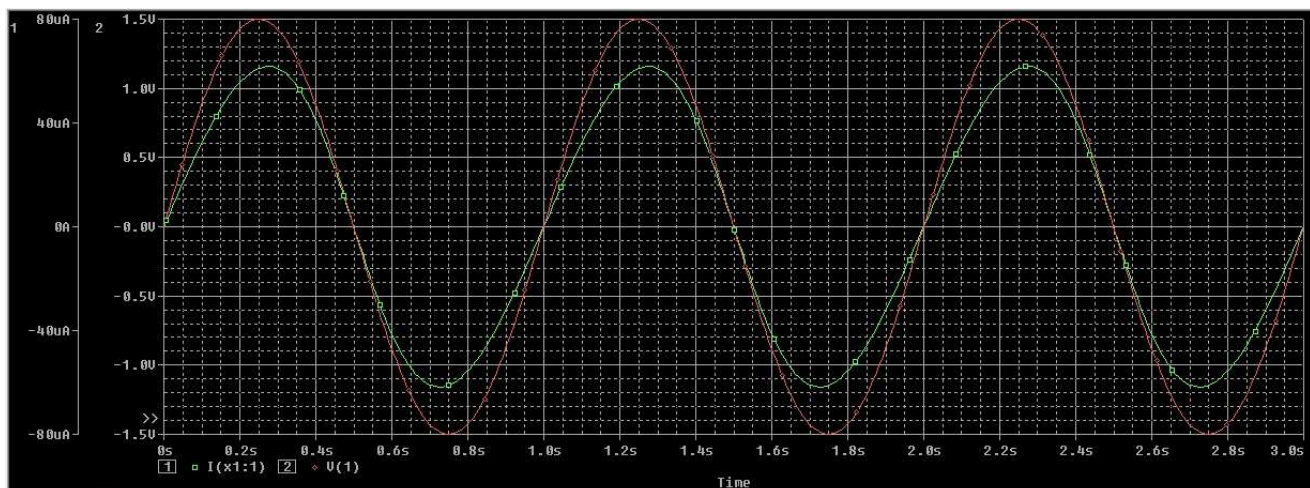
Obr. č. 11 d) popisuje priebeh súradnice x Memristora v čase. Súradnica x udáva pomer šírky obohatej oblasti w a celkovej šírky D vrstvičky TiO_2 .



Obr. č. 12 a) – závislosť magnetického toku Memristora na náboji Memristora



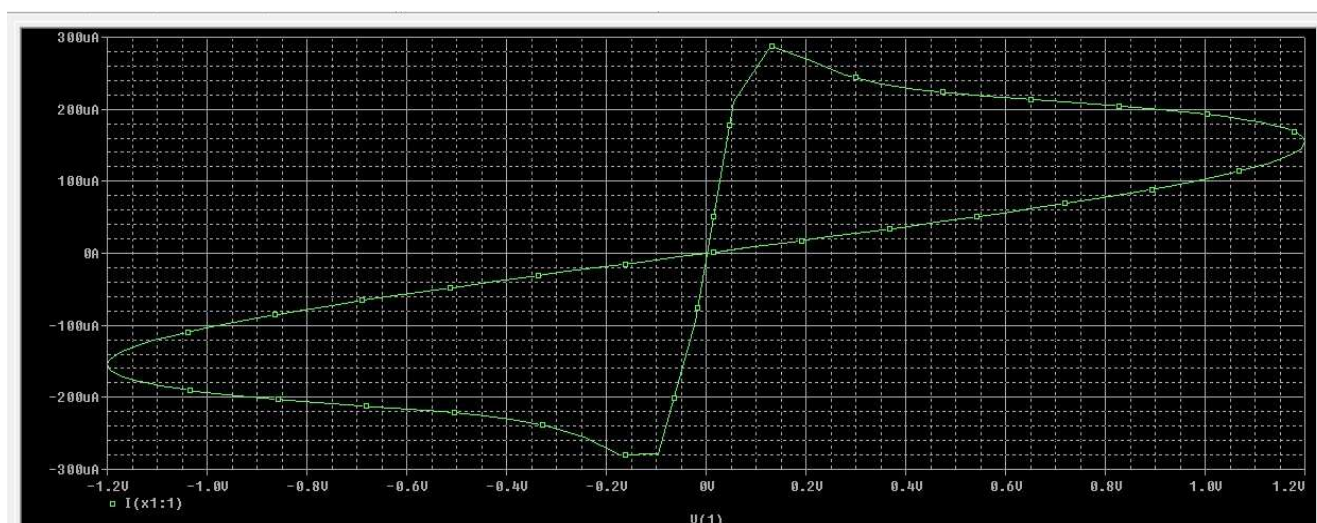
Obr. č. 12 b) – závislosť napätia Memristora na prúde Memristora



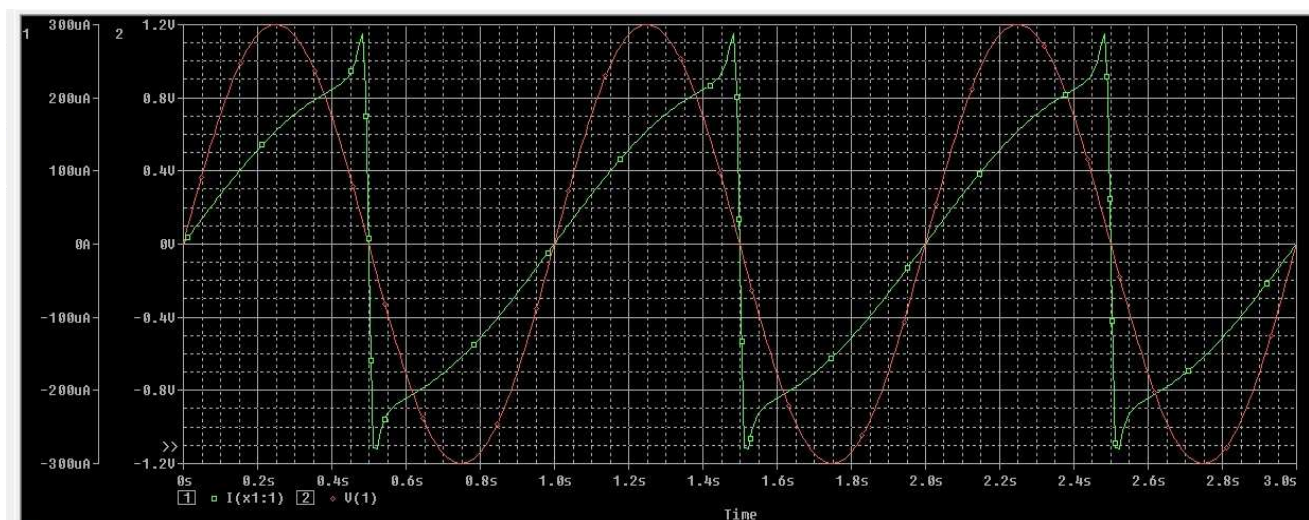
Obr. č. 12 c) – simulácia prúdu I_{mem} a napätia V_{mem} v časovej oblasti

Na obr. č. 12 a) b) a c) je simulovaný Memristor s parametrami $R_{ON}=100$ (100Ω), $R_{OFF}=38K$ ($38k\Omega$), $R_{INT}=28K$ ($28k\Omega$) a parameter okna funkcie $p=10$. Memristor je riadený harmonickým sínusovým napätím s amplitúdou 1,5 V a frekvenciou 1Hz.

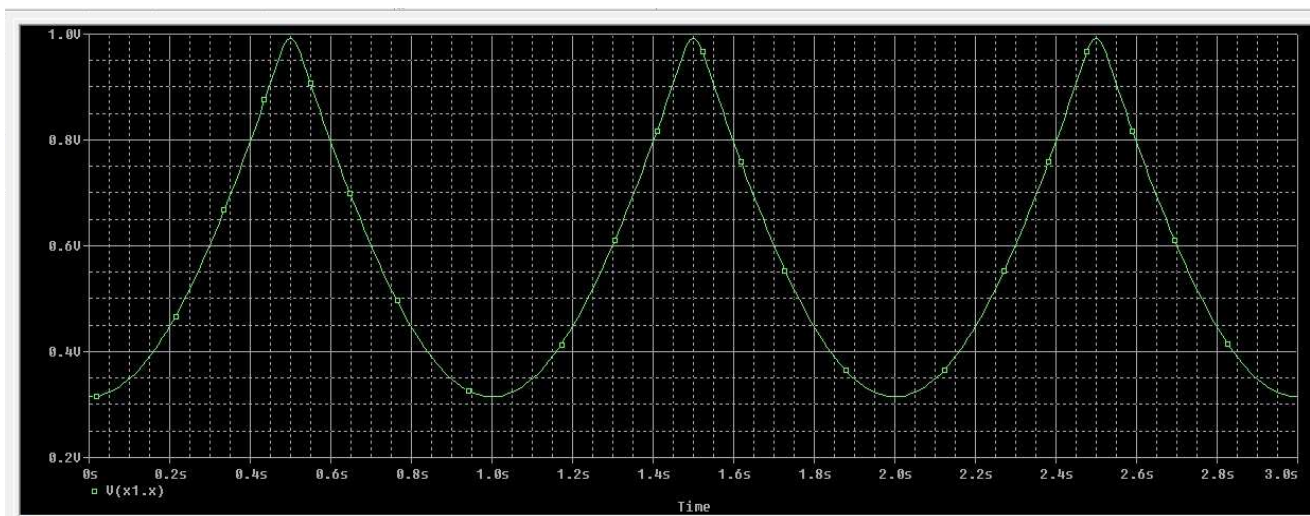
Ukážka simulácie pre tvrdé spínacie podmienky Memristora:



Obr. č. 13 a) – hysterézná slučka Memristora .Závislosť prúdu I_{mem} na napätí V_{mem}



Obr. č. 13 b) – simulácia prúdu I_{mem} a napätia V_{mem} v časovej oblasti



Obr. č. 13 c) – simulácia súradnice x Memristora

Memristor na obr. č. 13 a) b) a c) je simulovaný s parametrami $R_{ON}=100$ (100Ω), $R_{OFF}=16K$ ($16k\Omega$), $R_{INIT}=11k$ ($11k\Omega$) a parameter okna funkcie $p=10$. Memristor je riadený harmonickým sínusovým napätím s amplitúdou 1,2 V a frekvenciou 1Hz.

Nabíjacie a vybíjacie krivky memristora zobrazené na obr. č. 13 určujú vzťah medzi časovými integrálmi elektrického prúdu a napätia Memristora a potvrdzujú skutočnosť, že je medzi nimi vzťah 1:1. Simulácie na obr. č. 13 potvrdzujú tvrdé spínacie podmienky.

8 Modelovanie hraničných podmienok

Pri modelovaní a simuláciách priebehu Memristora vyrobeného v laboratóriách HP sa pri nastavení tvrdých spínacích podmienok objavili dva problémy, ktoré sú nazývané ako hraničné efekty Memristora, takzvané “Boudary effects”. Tieto hraničné problémy súvisia s definíciou okna funkcie (“window function”) [9] (4)

$$f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p}$$

Prvý problém spočíva v skutočnosti, že pri nastavovaní Memristora do hraničného alebo konečného stavu R_{ON} alebo R_{OFF} žiadne vonkajšie podnety nemôžu tento stav zmeniť späť na inú hodnotu. Inými slovami, Memristor by si takýto stav udržal navždy, čo je aj priamym dôsledkom a vyplýva to z rovnice (3):

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot i(t) \cdot f(x), \quad k = \frac{\mu_v \cdot R_{ON}}{D^2}$$

a nulovej hodnoty oknovej funkcie v hraničných stavoch.

Podľa aktuálne dostupných informácií si Memristor z laboratórií HP „pamätá“ x -ovú súradnicu hranice medzi dvoma vrstvami, nie hodnotu elektického náboja, ktorý ním prešiel. Táto os je úmerná len v rámci aktívnej oblasti Memristora. Avšak druhý problém oknovej funkcie spočíva v modelovaní Memristora ako súčiastky, ktorá si skutočne pamätá celkový náboj, ktorý prechádza Memristorom. Tento záver vyplýva aj z rovnice (3).

Ak oknová funkcia (4) je len funkcia x -ovej premennej, potom elektrický náboj

$$q_1 = \int_{x_0}^{x_1} \frac{d\xi}{kf(\xi)} \quad (7)$$

je potrebný pre prechod Memristora zo stavu x_0 do x_1 a rovnaký náboj, ale s opačným znamienkom

$$q_1 = \int_{x_1}^{x_0} \frac{d\xi}{kf(\xi)} = - \int_{x_0}^{x_1} \frac{d\xi}{kf(\xi)} = -q_2, \quad (8)$$

je potrebný pre jeho návrat zo stavu x_1 do x_0 . Pri riadení Memristora konštantným prúdom v určitom časovom intervale, napríklad za čas jednej minúty, rovnaký časový interval jednej minúty by bol potrebný na obnovenie stavu pred riadením, nedbajúc na skutočnosť, že Memristor by mohol byť vo svojom stave po celý čas, kým ním preteká prúd. Takéto meškania sa jednoznačne potvrdzujú v simuláciách SPICE Memristorov riadených prúdom. Bohužiaľ, takýto prevádzkový režim nie je popísaný v súčasnej literatúre. [4]

Okno funkcie môže byť teda považované za akúsi „mierku“, ktorá udáva s akou presnosťou Memristor ukladá množstvo elektrického náboja. Pamäťový efekt sa v hraničných stavoch, teda na rozhraní vrstiev Memristora, stráca. V okamihu, keď sa zmení aktuálny smer, sa hranica začne pohybovať opačným smerom, bez ohľadu na iné predchádzajúce smery a stavy, ktoré sú stratené. Memristor sa teda ďalej bude pohybovať po inej krivke.

Vyššie uvedený rozpor a nezrovnalosti medzi správaním modelu a požiadavkami na prevádzku reálneho obvodového prvku je možné vyriešiť zavedením (vytvorením) modifikovanej oknovej funkcie, ktorá modeluje fakt, že rýchlosti približovania a vzdialovania sa od hraníc tenkého filmu sú rôzne.

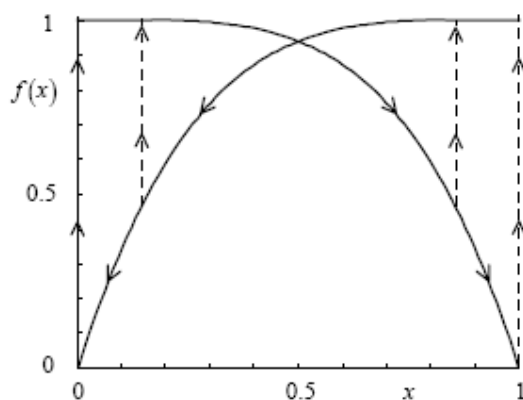
Nasledujúca funkcia (9) s grafom na obr. č. 12 spĺňa požiadavky na modifikovanú oknovú funkciu, ktorá je schopná modelovať rôzne rýchlosti pre približovanie a vzdialovanie sa od hraníc tenkého filmu tvoreného vrstvičkou TiO_2 .

$$f(x) = 1 - (x - \text{stp}(-i))^{2p} \quad (9)$$

kde p je celé kladné číslo, i je prúd Memristora.

$$\text{stp}(i) = \begin{cases} 1 & \text{pre } i \geq 0 \\ 0 & \text{pre } i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Prúd sa považuje za kladný, ak zväčšuje šírku obohatenej vrstvy alebo $x \rightarrow I$. Funkcia (9) je nulová v jednom z okrajov obohatenej vrstvy. Zväčšenie hodnoty p má za následok, že plocha oknovej funkcie strmo narastá k nule v $x=0$ a $x=I$.



Obr.č.12 - návrh nového modifikovného okna funkcie pre $p = 2$

Doterajšie výsledky zo simulácií Memristora v programe SPICE, simulované a modelované na základe stavových rovníc a rovníc pre modelovanie hraničných stavov a účinkov, dávajú uspokojivé výsledky zhodné s časťou doteraz publikovaných experimentov. Výnimkou je tvrdé riadenie vypínania ovládané nelineárnym iónovým priebehom, ktorý je charakterizovaný symetrickým hysteréznym cyklom. Na druhej strane je tento prípad modelovaný pomocou okna funkcie podľa Joglekara, ktorého všeobecné použitie je problematické. Ukázalo sa, že zostrojenie modelu Memristora by malo pozostávať z okna funkcie so správnymi modifikáciami, ktoré by mali byť závislé len na stavovej premennej x . Zrýchlenie takéhoto vývoja môžeme očakávať hneď ako budú známe informácie o nelineárnom iónovom priebehu. [5]

9 Aplikácie a využitie Memristora

9.1 Zhrnutie základných vlastností Memristora:

- Automatická zmena vodivosti štruktúry podľa veľkosti napätia (pretekajúceho prúdu)
- Pamäťový efekt = dlhodobé zapamätanie si hodnoty odporu aj po odpojení vonkajšieho zdroja
- Na rozdiel od MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) pamäte, ktorá používa magnetické bloky a je energeticky nezávislá alebo FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) feroelektrickej energeticky nezávislej pamäte s priamym prístupom, nie je pamäťová funkcia Memristora skoková, ale je lineárna.

- Memristor realizuje v jednej súčiastke zapojenie mnohých tranzistorov a odporov. Takáto realizácia zapojenia pomocou jednej súčiastky Memristora by prispela k ďalšej minimalizácii prístrojov a elektronických zariadení.
- Trvalé elektrické nastavenie hodnoty odporu.
- Memristor je možné aplikovať na priamy prevod $L \rightarrow C$. Na prevod magnetického poľa na statické (prevod na indukciu alebo náboj) bolo doposiaľ náročné a bolo potrebné prejsť cez dlhú cestu $L \rightarrow u \rightarrow i \rightarrow C$. S pomocou Memristora je možné uskutočniť to priamo.
- Funkcia Memristora nie je z matematického hľadiska nová ani nerealizovateľná dnešnými aktívnymi súčiastkami, ale v podobe Memristora z laboratórií HP to realizuje priamo len jedna súčiastka, len jeden prvok z fyzikálneho pohľadu.
- Pamäťová funkcia Memristora sa používaním nemení a umožňuje neobmedzený počet nastaviteľných cyklov“.

9.2 Budúce možné aplikácie Memristora

Memristor ako beznapäťová pamäť, energetický nezávislá s neobmedzeným počtom zapisovaných cyklov – dvojitavovým napätím je možné skokovo meniť odpor (vodivosť), a tým je tu možnosť realizovať obvody superjednoduchú pamäťovú bunku, kde 1 bit by bolo možné realizovať jedným Memristorom (1 bit = 1 Memristor).

Automatické odporové kompenzácie – Memristorom je možná úplná kompenzácia senzorov a meracích obvodov zmenou odporu kompenzačného rezistora na základe signálov napríklad z teplotného senzora.

Rozvoj flexibilných čipov - Flexibilné Memristory by umožnili rozvoj flexibilných čipov, ktoré by mohli byť použité v rôznych technológiách, vrátane použitia na liečebné účely, ako sú prístroje sledujúce srdcovú činnosť a rýchlosť alebo monitorovanie hladiny cukru v krvi. Toto vyhlásil NIST (National Institute of Standards and Technology).

Rozvoj non-volatívnych a volatívnych pamätí – Memristor spája výhodu non-volatívnych (energeticky nezávislých) pamätí ako sú napríklad pamäte typu Flash a volatívnych (energeticky závislých) pamätí ako sú napríklad pamäte typu DRAM. Memristor si dokáže informácie pamätať aj keď nie je pod prúdom, ale stále funguje rýchlosťou DRAM. Výrobou podobných technológií sa zaoberá každá väčšia spoločnosť, pretože pamäte takéhoto typu by znamenali revolúciu podobnú vynálezu tranzistora. Pamäťové média s Memristormi by boli schopné dokázať nahradiť operačné pamäte, pevné disky, Flash disky a optické média. Okrem zrýchlenia počítačov a veľkých úspor prúdov by to znamenalo tiež obrovské zisky pre výrobcov takýchto zariadení.

Odporové prepínanie – Memristor by mohol fungovať ako napätím riadená odporová „výhybka“ pre realizáciu signálových prepínačov.

Elektricky riadené odporové deliče – napríklad pre možnosť nastavenia nuly meracieho rozsahu a podobne.

Elektrické prepínanie – konštrukcia Memristora by mohla umožniť výrazné zmenšenie logických obvodov a pamätí, a to výrazne za hranice CMOS štruktúry.

Nové typy D/A prevodníkov – dôležitosť bitu bude odpovedať rôzna veľkosť odporu, respektíve pomeru odporového deliča.

Výroba tranzistorov – po niekoľkých pokusoch s funkčnými prototypmi sa podarilo zistiť, že z Memristora by bolo možné vyrábať aj tranzistory, ktoré by boli oveľa menšie (súčasný najmenší tranzistor meria 32 nm) a rýchlejšie, čiže tranzistory s nižšou spotrebou energie a menšími tepelnými stratami ako sú klasické polovodičové tranzistory. Takéto memristorové tranzistory by mohli zaručiť pokračovanie Moorovho zákona („Moorov zákon je empirické pravidlo, ktoré hovorí, že zložitost integrovaných obvodov sa zdvojnásobuje každých 24 mesiacov, pričom cena ostáva konštantná.“), ktorý začína byť ohrozený.

Napodobňovanie funkcie ľudského mozgu – Memristor by mohol realizovať na počítačoch najväčšiu technologickú výzvu, napodobniť funkciu ľudského mozgu. Memristory by teda mohli umožniť emulovať namiesto simulácie siete neurónov a synapsí. Výskumné skupiny ako sú napríklad IBM Blue Brain, pracujú na vytvorení umelého mozgu. Avšak realizácia čo len najmenšieho mozgu v reálnom čase by si vyžadovala riešenie astronomického počtu parciálnych a diferenciálnych rovníc. Digitálny počítač schopný urobiť tieto výpočty by bol veľký ako malé mesto a na napájanie by potreboval niekoľko atómových elektrární.

Memristory môžu byť vytvorené s extrémne malými rozmermi a boli by schopné fungovať ako synapsie. S použitím Memristorov by bolo možné vytvoriť analógové obvody s rozmermi porovnateľnými s rozmermi “krabice od obuvi” a mohli by fungovať na rovnakých fyzikálnych princípoch ako ľudský mozog.

Hybridný obvod obsahujúci množstvo spojených Memristorov a tranzistorov môže pomôcť odhaliť a popísať funkcie mozgu. Takýto obvod môže viesť k vytvoreniu strojov, ktoré by dokázali rozoznávať vzory rovnako ako ľudia spôsobmi, ktorými to počítače nedokážu.

10 Záver

Memristor teoreticky popísaný profesorom Leonom O. Chuaom v roku 1971, bol dlho považovaný skôr za kuriozitu. Aj keď jeho vlastnosti boli známe a boli popísané, nepodarilo sa ho vytvoriť ako pasívnu súčiastku. Cesta k vytvoreniu Memristora nebola ľahká - 37 rokov bolo treba k rozvoju nanotechnológií. Memristor je síce vyrobený z bežných materiálov (vrstva oxidu titaničitého, vložená medzi dve vrstvy platiny), ale problémom bolo urobiť všetko na dosť tenkej doske. Pri väčšej hrúbke efekt nenastane.

Aj keď sa vedelo, že Memristor je jedným z mnohých memristivných systémov, ktoré veľa výskumníkov ešte pred profesorom Chuaom označovalo ako “nenormálne prúdovo-napäťové správanie” v mikrometrových zariadeniach vytvorených z nekonvenčných materiálov (polyméry a oxidy železa), boli tieto výstrednosti v elektronike pripisované tajomnu elektrochemických reakcií alebo iným zvláštnym fenoménom vysokých napätí, ktoré výskumníci aplikovali na ich zariadenia. Neskôr sa ukázalo, že väčšina týchto správ boli neidentifikované prípady memristancie.

Dnes je zrejmé, že memristancia je vlastnosť každého elektronického obvodu. Jej existencia by mohla byť odvodená Gustavom Kirchhoffom alebo Jamesom Clerkom Maxsvellom už v 19. storočí, keby skúmali nelineárne obvody. Ale miera, v ktorej boli vytvárané elektronické zariadenia v tej dobe, neumožňovala experimentálne skúmanie tohto efektu. Ukázalo sa, že memristancia je miliónkrát dôležitejšia v nanometrovej mierke ako v mierke mikrometrovej. A je prakticky nepozorovateľná v milimetrovej a väčšej mierke. Memristancia nebola dlho na prvý pohľad viditeľná.

Napriek všetkým možnostiam bol Memristor objavený v laboratóriách Hawlett Packard úplnou náhodou pri výskume vrstvičky oxidu titaničitého. Toto zariadenie znamená veľkú revolúciu v elektronike na čom sa zhodujú profesor Chua a Stanley Williams.

Od uverejnenia článku „The Missing Memristor found“ (Chýbajúci Memristor nájdený) [3] v máji 2008 sa dostáva tento štvrtý pasívny prvok do čoraz väčšej pozornosti. Otvarajú sa a objavujú rôzne predstavy o uplatnení Memristora v elektronike a jeho ďalších možných budúcich aplikáciách a použitíach, ako je napríklad tvorba nových dokonalejších a rýchlejších pamätí alebo možnosti napodobňovania činnosti ľudského mozgu pomocou použitia Memristorov.

Keďže fyzické vzorky Memristora nebudú pravdepodobne ešte nejakú dobu k dispozícii, je pre ďalší výskum veľmi užitočný model Memristora vytvorený v programe SPICE. Tento model umožňuje jednoduchú úpravu nelineárnych vzťahov, ktoré popisujú účinky v hraničných situáciách. Výsledky SPICE simulácií dávajú možnosť uskutočniť zaujímavé, experimentálne simulácie, ktoré môžu mať veľký význam pre ďalší výskum.

11 Zoznam použitej literatúri

- [1] CHUA, L.O. Memristor – The Missing Circuit Element
- [2] OSTER, G.F., AUSLANDER, D.M. The Memristor: A New Bold Graph Element
- [3] CHUA, L.O., KANG, S.M. Memristive Devices and Systems
- [4] STRUKOV, D.B., SNIDER, G.S., STEWART, D.R., WILLIAMS, R.S. The missing memristor found
- [5] BIOLEK, Z., BIOLEK, D., BIOLKOVÁ, V. SPICE Model of memristor with nonlinear dopand drift
- [6] Zdeněk BIOLEK, Dalibor BIOLEK – Úvod do studia memristoru
- [7] WILLIAMS, R.S. How we found the missing memristor
- [8] <http://webcast.barkeley.edu/events.php> - kompetný videozáznam sympózia Memristor and Memristive Systems, Barkeley, November 2008
- [9] <http://www.memristor.org/>
- [10] <http://demonstrations.wolfram.com/CurrentVoltageCharacteristicsOfAMemristor/>
- [11] <http://wapedia.mobi/en/Memristor>